第 31 卷 第 1 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 31 No.1
2018 年 3 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Mar. 2018

考虑新旧部分协调的 CFRP 加固 RC 梁可靠度分析

杨建江， 石 谦

(天津大学 建筑工程学院,天津 300072)

摘要:对于粘贴 CFRP 片材加固的 RC 梁,给出了加固梁可靠度计算的一种新方法。分别计算原有部分和新加部分的可靠度,分析了 CFRP 材料性能、片材用量、滞后应变等因素对新旧部分的可靠度及其协调一致的影响。结果表明,在混凝土压坏的破坏模式下,提高 CFRP 材料性能及用量,原有部分可靠度基本保持不变,新加部分可靠度提高;在 CFRP 极限拉应变平均值取 0.014,材料分项系数取 1.5,配布率取最小设计配布率时,各部分可靠度能够协调一致。

关键词:钢筋混凝土梁;CFRP;加固;可靠度

中图分类号:TU312+1 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-0373(2018)01-0016-06

0 引言

近年来,对既有结构的加固改造受到人们的广泛关注,加固技术发展迅速[1],采用 FRP 加固混凝土结构的方法越来越受到了工程界的重视[2]。Atadero et al[3]对加固桥梁结构中的桥面板的可靠度进行了分析,并通过试验确定了 FRP 材料的统计特征参数。孙晓燕等[4]收集了大量实验样本得到了 FRP 计算模式不确定性统计参数。何政等[5]对 CFRP 片材加固钢筋混凝土构件的可靠度指标进行了参数分析,指出了影响可靠度的主要因素。现阶段 FRP 加固混凝土结构可靠度的研究主要集中在将加固后 RC 梁原有部分和新粘贴的 FRP 作为整体,计算整体的抗力和作用效应并进行可靠度分析。但实际上,RC 梁的破坏一般由新旧部分中可靠性较差的一部分引起,应避免结构因某一部分可靠性较低导致结构失效。当结构新旧部分可靠度保持一致或相近时,结构整体可靠性好,材料得到充分利用,加固工程也比较经济可靠。同时,建立新旧部分可靠度计算公式和分析其影响因素,对于研究加固后钢筋混凝土构件新旧部分的剩余寿命具有重要意义。

1 CFRP 加固钢筋混凝土的研究

加固时受拉钢筋可能处于两种状态:已经屈服或未屈服。若钢筋已经屈服,卸载后钢筋将产生残余应变;若钢筋尚未屈服,钢筋处于弹性阶段,卸载后应变可恢复。本文的分析仅限于钢筋未屈服或残余应变较小的情况,并考虑二次受力对可靠度的影响,同时在加固设计时,为了控制加固后钢筋混凝土结构的裂缝宽度及变形,对其承载力提高幅度不超过 40%。

1.1 FRP 加固 RC 梁的破坏模式

FRP 加固 RC 梁的破坏模式可分为以下几种主要类型:(1)混凝土被压碎引起的弯曲破坏;(2)FRP 被拉断引起的弯曲破坏;(3)剪切破坏;(4)剥离破坏。规范[6]在对粘贴 CFRP 抗弯加固设计时规定,应避免受剪破坏先于受弯破坏发生。粘贴 CFRP 的目的是为了提高梁整体承载力,故设计时应保证 CFRP 不被拉断,对混凝土压碎的破坏模式进行分析,加固设计时为保证破坏模式为混凝土压碎,对混凝土受压区高度 x 进行限制,即

$$\xi_{cfb}h \leqslant x \leqslant 0.8\xi_b h_0 \tag{1}$$

收稿日期:2016-09-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2018.01.04

作者简介:杨建江(1956—),男,博士,教授,主要从事钢筋混凝土结构基本理论及强度,既有房屋的检测、鉴定及可靠度评定理论,结构物的检测技术的研究。E-mail:yangjj_001@163.com.

杨建江,石谦.考虑新旧部分协调的 CFRP 加固 RC 梁可靠度分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(1):16-21.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中,ξ_{cfb} 为碳纤维片材达到其允许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限相对受压区高度;ξ_b 为构件加固前的相对界限受压区高度;h 为截面宽度;h_0 为截面的有效高度。

1.2　钢筋混凝土构件的抗力衰减分析

建筑结构在长期使用过程中受到环境等因素影响,结构抗力将发生衰减使得可靠度降低。文献[7]对既有结构,考虑抗力随时间的衰减作用,建立了既有结构抗力衰减模型。设 $\varphi_c(t)$ 为混凝土强度随时间 t 衰减的函数,$\varphi_s(t)$ 为钢筋强度随时间 t 衰减的函数,$\varphi_c(t)$ 和 $\varphi_s(t)$ 均为确定性函数。

2　CFRP 加固 RC 梁抗力和荷载分析

2.1　新旧部分的抗弯承载力计算方法

以单筋矩形截面受弯构件为例。对粘贴 FRP 片材进行受弯加固承载力计算时,采用规范[6]中对受弯构件正截面承载力计算的基本假定。混凝土压碎破坏模式下,RC 梁破坏时,受拉钢筋已屈服,CFRP 未破坏,梁破坏由混凝土压坏控制,截面应力和应变沿梁高的分布如图 1 所示。此时 $\varepsilon_c=\varepsilon_{cu}$,$\varepsilon_s=\varepsilon_y$,$\varepsilon_f<\varepsilon_{fu}$。

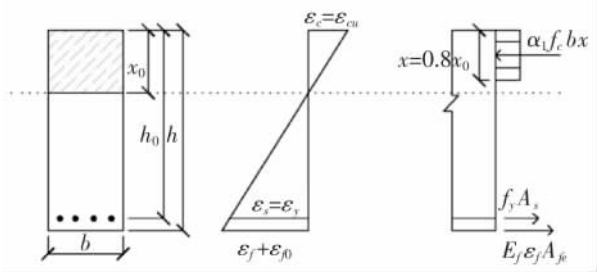

图 1　受弯构件承载力极限状态时正截面计算简图

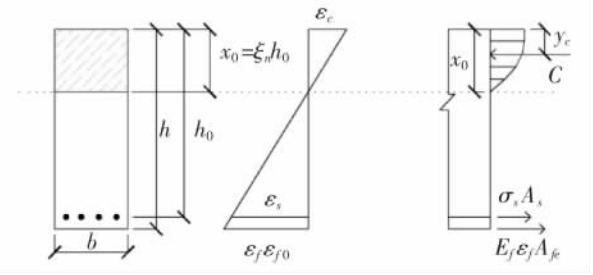

图 2　给定荷载作用下受弯构件正截面计算简图

图 1 中 ε_c 为混凝土压应变,ε_{cu} 为混凝土极限压应变,ε_s 为钢筋拉应变,ε_y 为钢筋屈服拉应变,ε_f 为 CFRP 拉应变,ε_{fu} 为 CFRP 极限拉应变,ε_{f0} 为考虑二次受力影响时 CFRP 的滞后应变,α_1 为混凝土强度折减系数,f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值,f_y 为钢筋屈服强度,b 为截面宽度,h 为截面高度,A_s 为受拉区钢筋的截面面积,E_f 为 CFRP 的弹性模量,A_{fe} 为 CFRP 的有效截面面积,x 为混凝土受压区等效高度,x_0 为混凝土受压区实际高度。图 2 中,C 为受压区混凝土合压力,y_c 为受压区混凝土合压力作用点到受压区混凝土边缘的距离,σ_s 为受拉钢筋的应力,ξ_n 为实际受压区高度与截面有效高度比。

由平截面假定知 CFRP 的应变

$$\varepsilon_f=0.8\varepsilon_{cu}h/x-\varepsilon_{cu}-\varepsilon_{f0} \tag{2}$$

式中,ε_{f0} 按规范[6]取。

考虑抗力衰减的力平衡方程

$$\varphi_c(t)\alpha_1 f_c bx=\varphi_s(t)f_yA_s+E_f\varepsilon_fA_{fe} \tag{3}$$

将式(2)代入式(3)中解出 x。对受压区混凝土合力作用点取矩,考虑抗力衰减的影响,对规范中的极限承载力计算公式改进,得原有部分承载力 M_1 和新加部分承载力 M_2 分别为

$$M_1=\varphi_s(t)f_yA_s(h_0-0.5x) \tag{4}$$

$$M_2=E_f\varepsilon_fA_{fe}(h-0.5x) \tag{5}$$

设 FRP 加固后 RC 梁的极限抗弯承载力为 M_u。显然 $M_u=M_1+M_2$。

设 K_p、R_p 分别为计算模式的不确定性系数和结构的计算抗力,结构抗力 R 近似认为服从对数正态分布,计算模式不确定性变量参数取 $\mu_{K_p}=1.098$,$\delta_{K_p}=0.251$[4]。根据式 $R=K_pR_p$ 和误差传递公式可分别求得加固后原有部分和新加部分的结构抗力平均值和变异系数。

2.2　荷载分配

CFRP 加固 RC 梁后,在给定的荷载 S 作用下,计算简图如图 2 所示。设原有部分承担荷载设计值为 S_1,新加部分承担的荷载设计值为 S_2,则有

$$S_1+S_2=S \tag{6}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$S_1 = \varphi_s(t)\sigma_s A_s(h_0 - y_c) \tag{7}$$

$$S_2 = E_f \varepsilon_f A_f(h - y_c) \tag{8}$$

由力平衡方程得

$$\varphi_c(t)C = \varphi_s(t)\sigma_s A_s + E_f \varepsilon_f A_{fe} \tag{9}$$

式中,y_c 和 C 与混凝土所处的应变状态有关,当 $\varepsilon_c < \varepsilon_0$ 时,$y_c = \xi_n h_0 \left(4 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) / \left(12 - \frac{4\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)$,$C = f_c b \xi_n h_0 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_0^2}\right)$;当 $\varepsilon_0 \leqslant \varepsilon_c \leqslant \varepsilon_{cu}$ 时,$y_c = \xi_n h_0 \left[1 - \left(6 - \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_c^2}\right) / \left(12 - \frac{4\varepsilon_0}{\varepsilon_c}\right)\right]$,$C = f_c b \xi_n h_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c}\right)$。式中 σ_s 与钢筋所处的应变状态有关,钢筋未屈服即 $\varepsilon_s < \varepsilon_y$,取 $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$;屈服时即 $\varepsilon_s \geqslant \varepsilon_y$,取 $\sigma_s = f_y$(f_y 为钢筋抗拉强度设计值)。ε_0 为混凝土应力峰值对应的压应变。

由平截面假定得

$$\frac{\varepsilon_c}{\xi_n h_0} = \frac{\varepsilon_s}{h_0 - \xi_n h_0} = \frac{\varepsilon_{f0} + \varepsilon_f}{h - \xi_n h_0} \tag{10}$$

对给定的荷载 S,将式(7)和式(8)代入式(6)。根据应力应变关系,混凝土有 $\varepsilon_c < \varepsilon_0$ 和 $\varepsilon_0 \leqslant \varepsilon_c \leqslant \varepsilon_{cu}$ 两种情况;钢筋有屈服和未屈服两种情况,故钢筋和混凝土的应力应变关系有 4 种状态,分别作 4 种假设。在 4 种假设下分别联立方程(6)、(9)和(10),求解 ε_c、ε_s、ε_f、ξ_n 并检验假设是否成立,若成立即得到真值。可借助 Matlab 编程对该非线性方程组进行求解,将结果代入式(7)和式(8)中可得 S_1 和 S_2。

2.3 荷载效应统计参数

对于承载能力极限状态,应选取永久荷载控制的荷载组合值和可变荷载控制的荷载组合值中最不利的确定,本文考虑永久荷载和一种可变荷载组合的情况,构件承载力极限状态荷载效应设计值

$$S_d = \max\{\gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk}, \gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q \psi_c S_{Qk}\} \tag{11}$$

式中,S_{Gk}、S_{Qk} 分别为恒载、活载标准值;γ_G、γ_Q 分别为恒载、活载的分项系数,当组合荷载由活荷载控制时按 $\gamma_G = 1.2$,$\gamma_Q = 1.4$ 取,由恒荷载控制时按 $\gamma_G = 1.35$,$\gamma_Q = 1.4$,$\gamma_c = 0.7$ 取。

本文荷载统计特征参考文献[8],如表 1 所示。

表 1 结构荷载统计参数

参数名称	平均值/标准值	变异系数	分布类型
永久荷载	1.06	0.07	正态
住宅可变荷载	0.644	0.233	极值Ⅰ型
办公楼可变荷载	0.524	0.288	极值Ⅰ型

3 CFRP 加固 RC 梁的可靠度计算与分析

3.1 可靠度计算方法

本文仅考虑永久荷载和一种可变荷载组合的情况,得到加固 RC 梁的功能函数为

$$Z = R - S_G - S_Q \tag{12}$$

式中,S_G,S_Q 分别为永久荷载效应和可变荷载效应随机变量。

JC 法在可靠性分析和设计中应用广泛[9],采用 JC 法求解可靠度即可得出 RC 梁原有部分可靠度 β_1 和新加部分可靠度 β_2,本文方法取 β_1 和 β_2 两者较小值为 RC 梁结构可靠度,设 β_N 为本文方法确定的结构可靠度,即 $\beta_N = \min\{\beta_1, \beta_2\}$。由于 β_1 和 β_2 两者越相近可靠度一致性越好,故可用 $\Delta\beta = |\beta_1 - \beta_2|$ 表示结构可靠度的一致性。为了对比分析,本文将 RC 梁新旧部分视为整体而得出的可靠度称为整体法可靠度,记为 β_Z。

表 2 基本变量的统计参数

参数名称	平均值/标准值	变异系数	分布类型
受压钢筋强度 f'_y	1.08	0.08	正态分布
C30 混凝土强度 f_c	1.45	0.19	正态分布
碳纤维布强度 f_f	1.21	0.10	正态分布
碳纤维布面积 A_{fe}	1.00	0.03	正态分布

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　计算分析

某住宅楼已使用 40 a,其中某钢筋混凝土梁,梁矩形截面尺寸为 $b=300$ mm,$h=800$ mm,C30 混凝土,梁底部受拉钢筋为 HRB235,受拉钢筋截面总面积 2 945 mm^2,受拉钢筋中心到梁底距离 $a_s=35$ mm,加固前 RC 梁上原作用的弯矩标准值为 $M_{0k}=200$ kN·m,活荷载与恒荷载比值取 $\rho=0.7$,弯矩设计值为 560 kN·m。考虑抗力衰减影响,混凝土和钢筋的强度衰减系数为 $\varphi_c(t)=1.0-8.0\times10^{-7}t^3$,$\varphi_s(t)=1.0-2.2\times10^{-6}t^3$,其它基本变量的统计参数见表 2,用本文方法计算原有部分可靠度和新加部分可靠度,分析各参数对可靠度的影响及新旧部分可靠度协调一致性的影响。并与整体法进行对比。

3.2.1　可靠度计算时 CFRP 极限拉应变均值$\overline{\varepsilon_{fu}}$的取值问题

文献[10]给出了不同种类 CFRP 的极限拉应变,变化范围较大。在进行抗力均值计算时,理论上应取 CFRP 极限拉应变平均值进行计算,但在实际计算中,部分学者[11]偏于安全地取 CFRP 极限拉应变设计值 $\varepsilon_{fu,s}$ 进行计算;也有学者[12]取其实际平均值进行计算。采用高强度Ⅱ级碳纤维布加固,按计算的 CFRP 最小使用面积 $A_{fe,\min}=65$ mm^2 加固,结果如图 3 所示,表示$\overline{\varepsilon_{fu}}$取 0.012～0.018 对可靠度的影响。从图中可知,整体法可靠度随 CFRP 拉应变平均值变化相差不大,但新加部分可靠度随其变化很大。新加部分可靠度随 CFRP 极限拉应变增大而增大,原有部分可靠度基本不变。图中曲线的交点表示$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$ 时,新旧部分的可靠度协调一致性取得最佳。从$\overline{\varepsilon_{fu}}$的取值上说明,过于保守地取值将显著降低新加部分的可靠度,使得 RC 梁可靠性由原有部分控制转变到新加部分控制,造成 RC 梁可靠度低的"假象",不能够反映其真实情况,故$\overline{\varepsilon_{fu}}$的取值不宜过于保守。在进行可靠度计算时应综合考虑新旧部分可靠度的协调性,CFRP 材料的统计参数,以及规范[6]中对塑性变形的控制条件等因素来确定$\overline{\varepsilon_{fu}}$的取值。

3.2.2　CFRP 材料分项系数 γ_f

采用高强度Ⅱ级碳纤维布,取$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.018$,计算知 CFRP 最小使用面积 $A_{fe,\min}=65$ mm^2,按最小面积加固,结果如图 4 所示,在混凝土压碎的破坏模式下,随 CFRP 材料分项系数的增大,CFRP 强度设计值变小(安全储备越高),新加部分可靠度增加而原有部分可靠度不变。从结构可靠度上看,结构可靠度先增加,后转由原有部分控制后,结构可靠度不再变化。新旧部分可靠度一致性最佳点在 $\gamma_f=1.1$ 处取得,且之后 γ_f 越大,新旧部分可靠度相差越大,两者一致性越差。

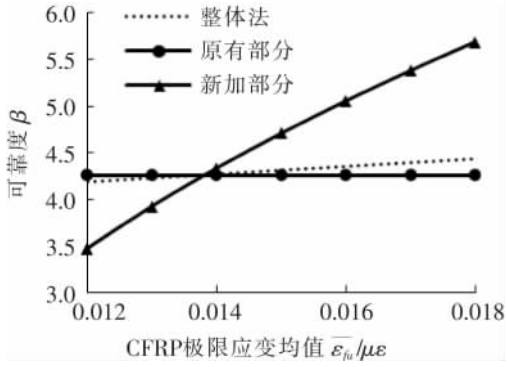

图 3　CFRP 极限拉应变平均值$\overline{\varepsilon_{fu}}$对可靠度的影响

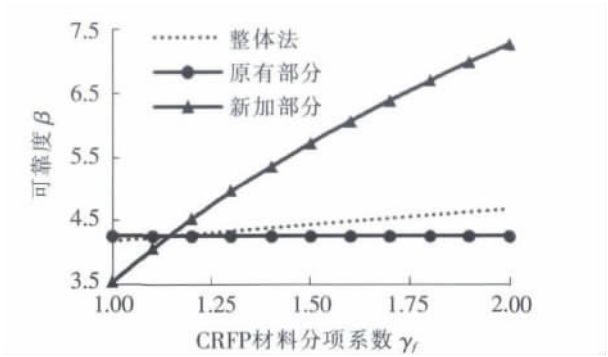

图 4　CFRP 材料分项系数 γ_f 对可靠度的影响

3.2.3　CFRP 弹性模量 E_f

取 CFRP 强度 $f_{fk}=3\,000$ MPa,材料分析系数 $\gamma_f=1.5$,极限拉应变均值$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.018$,随着 E_f 增大,CFRP 最小加固面积由 100 mm^2 降到 57 mm^2。按最小设计加固面积加固时,新旧部分可靠度基本不随 CFRP 弹性模量变化($\beta_1=4.26$,$\beta_2=5.73$)。若按 $A_{fe}=100$ mm^2 进行加固,结果如图 5 所示,随着 E_f 增大,新加部分可靠度增加,原有部分可靠度不变,新旧部分可靠度差距不断增大,可靠度一致性变差;整体法可靠度认为,结构可靠度随着 CFRP 弹性模量增大而增大,前后可靠度最大相差 0.4,影响有限;由于新加部分可靠度一直高于原有部分,故结构可靠度取原有部分,基本不变。因此进行加固设计时,使用弹性模量较大的 CFRP 可以降低其使用面积,但并不能提高结构可靠度。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2.4 CFRP 配布率 ρ_f

选用高强度Ⅱ级 CFRP 布($f_{fk}=3\ 000$ MPa,$\gamma_f=1.5$),配布率 $\rho_f=A_{fe}/(bh)$,加固设计时为满足承载力的要求和保证破坏模式为混凝土压碎破坏,经计算 CFRP 配布率最小为 $\rho_{f,\min}=0.27\times10^{-3}$,最大为 $\rho_{f,\max}=1.48\times10^{-3}$。分别取$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.018$,$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$,结果如图 6 和图 7 所示。从图中可知,随着 ρ_f 的增大,新加部分可靠度增加,原有部分可靠度基本不变(微降);当$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.018$ 时新旧部分可靠度无法取得一致,当$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$ 时新旧部分可靠度在最小配布率 $\rho_{f,\min}=0.27\times10^{-3}$ 处取得一致,表 3 表示$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$,CFRP 配布率取最小设计配布率 $\rho_{f,\min}$ 时,不同种类 CFRP 的新旧部分可靠度及一致性情况,结果表明,在$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$,CFRP 配布率按最小设计配布率 $\rho_{f,\min}$ 时,不同种类的 CFRP 新旧部分可靠度一致性均取得较好情况。因此,在混凝土破坏模式下,进行加固设计时,按照设计的最小配布率能够使新旧部分可靠度协调一致性最佳,提高配布率虽然能够使新加部分可靠度增加,但不能提高结构可靠度。

3.2.5 滞后应变 ε_{f0}

采用高强度Ⅱ级碳纤维布,取$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$,计算知滞后应变 ε_{f0} 越大,CFRP 最小使用面积 $A_{fe,\min}$ 越大,取 $A_{fe,\min}=80\ \text{mm}^2$,分析结果如图 8 所示,在混凝土破坏模式下,滞后应变 ε_{f0} 越大,新加部分可靠度越低,原有部分基本不变。这是因为滞后应变增大,原有部分承担的荷载微增,原有部分的抗力微减,新加部分承担的荷载微减,新加部分的抗力减少,新加部分抗力减少速度大于荷载减少速度,故新加部分可靠度降低。因此,卸载有利于结构抗力增大,减少 CFRP 材料用量,能够有效提高新加部分可靠度,但对于原有部分可靠度基本无影响。

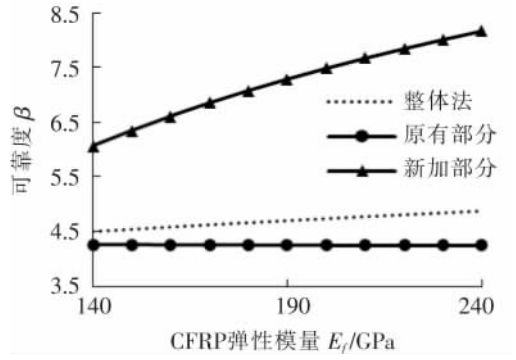

图 5 CFRP 弹性模量 E_f 对可靠度的影响

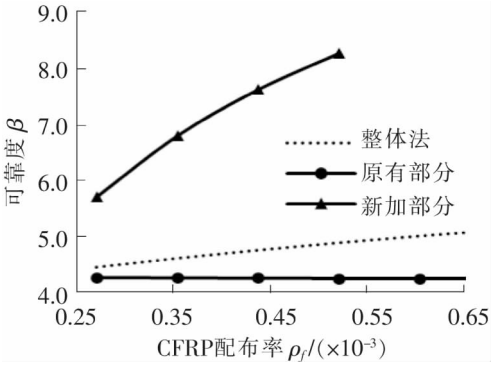

图 6 CFRP 配布率 ρ_f 对可靠度的影响($\overline{\varepsilon_{fu}}=0.018$)

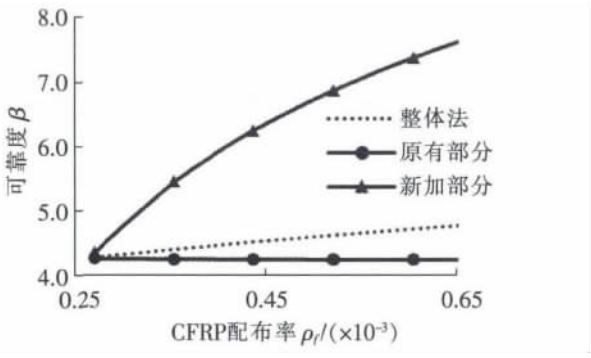

图 7 CFRP 配布率 ρ_f 对可靠度的影响($\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$)

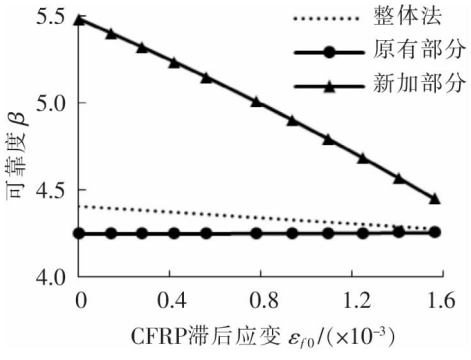

图 8 滞后应变 ε_{f0} 对原有部分可靠度的影响

表 3 不同种类 CFRP 的可靠指标计算结果

纤维种类	CFRP 配布率 ρ_f/(×10⁻³)	原有部分可靠度 β_1	新加部分可靠度 β_2	可靠度一致性 $\Delta\beta$
高强度Ⅰ级 CFRP 布	0.234	4.257	4.404	0.147
高强度Ⅱ级 CFRP 布	0.269	4.257	4.333	0.076
高强度Ⅰ级 CFRP 板	0.337	4.257	4.343	0.085
高强度Ⅱ级 CFRP 板	0.385	4.257	4.611	0.353

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　结语

对 CFRP 加固的 RC 梁，考虑加固后新旧部分的协调，分别建立了加固后 RC 梁原有部分和新加部分可靠度计算公式，得到了新旧部分的可靠度，给出了加固梁可靠度计算的新方法，并得出以下结论：

(1)新加部分可靠度受 CFRP 的极限拉应变平均值$\overline{\varepsilon_{fu}}$、材料分项系数 γ_f、弹性模量 E_f 和配布率 ρ_f 影响，且均随之增大而增大，原有部分可靠度基本不受影响。滞后应变对新加部分可靠度不利。

(2)CFRP 极限拉应变平均值$\overline{\varepsilon_{fu}}$取值对可靠度的影响不可忽略，且取$\overline{\varepsilon_{fu}}=0.014$，$\gamma_f=1.5$，CFRP 配布率 $\rho_{f,\min}$按最小设计配布率时，不同种类的 CFRP 新旧部分可靠度均能取得较好的一致性。

(3)在混凝土压碎的破坏模式下，提升 CFRP 的力学性能及用量，可使其达到新旧部分可靠度一致性最佳点，但继续提高其力学性能或用量并不能有效提高结构可靠度。由于结构可靠度由可靠度较低的部分控制，故粘贴 CFRP 加固 RC 梁，其可靠度的提高是有限的。

参　考　文　献

[1]蒋璐.砌体结构体外预应力加固技术设计方法及施工实现[J].石家庄铁道大学学报：自然科学版，2016，29(3)：7-12.

[2]秦丽辉，王宗林.玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁抗剪性能研究[J].石家庄铁道大学学报：自然科学版，2014，27(2)：12-18.

[3] Atadero RA, Karbhari VM. Source of uncertainty and design value for field-manufactured FRP[J]. Composite Structure, 2009, 89(5):83-93.

[4]孙晓燕，黄承逵，孙保沭.既有桥梁外贴纤维布加固后可靠度分析[J].东南大学学报：自然科学版，2005，35(3)：427-432.

[5]何政，李小明. FRP 配筋混凝土结构可靠度设计[J].哈尔滨工业大学学报，2008，40(8)：1177-1183.

[6]中华人民共和国建设部.GB50367—2013 混凝土结构加固设计规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2013.

[7]张耀华，王铁成，杨建江.考虑抗力随时间衰减的既有结构可靠度分析[J].山东农业大学学报：自然科学版，2006，37(3)：429-435.

[8]史志华，胡德忻，陈基发.钢筋混凝土结构安全度水准修订评估[J].建筑科学，2002，18(2)：50-57.

[9]张昀青，李维珍，闫静昌，等.边坡可靠性指标及敏感性因素分析[J].石家庄铁道大学学报：自然科学版，2015，28(1)：62-65.

[10]王文炜. FRP 加固混凝土结构技术及应用[M].北京：中国建筑工业出版社，2007：20-21.

[11]张建仁，毛杰，彭建新，等.使用碳纤维板加固的 RC 梁桥服役过程可靠度指标分析[J]. 长沙理工大学学报，2014，11(2)：25-31.

[12]闫磊，任伟. FRP 加固桥梁受弯构件的可靠性分析[J]. 郑州大学学报：工学版，2011，32(2)：80-83.

Research of Reliability for the Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Laminates Considering the Coordination of New and Old Parts

Yang Jianjiang,　Shi Qian

(Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on reinforced concrete beams (RC beams) strengthened with CFRP laminates, a new method for calculating the reliability of RC beams is presented. The reliability of the new part and the original part are calculated, and the influence of the material properties, the content and Post-Strain of CFRP on the reliability and consistency of the new part and the original part are analyzed. The results show that, under concrete crushing failure, with improved material properties and content of CFRP, the reliability of the original part stays almost unchanged, while the reliability of the new part increases. The reliability of the various parts reaches good consistency when CFRP ultimate tensile strain average is 0.014, CFRP material partial coefficient is 1.5, and CFRP ratio is the minimum design value.

Key words: reinforced concrete beam; CFRP; strengthening; reliability

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net